第40卷 第2期
2023年2月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 40 No. 2
Feb. 2023

# FY-4A卫星在宁夏短时强降水中的适用性研究

邵 建[1,2,3]， 张肃诏[1,4]， 陈 敏[2]， 李 强[4]， 郑友炯[2]， 程 瑶[2]， 马 宁[5]

（1. 中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室，宁夏 银川 750002；2. 银川市气象局，宁夏 银川 750002；3. 宁夏气象防灾减灾重点实验室，宁夏 银川 750002；4. 宁夏气象台，宁夏 银川 750002；5. 宁夏气象信息中心，宁夏 银川 750002）

**摘 要：**通过收集2018—2020年宁夏短时强降水个例及其对应时段的FY-4A卫星资料，选取FY-4A卫星云类型CLT、云相态CLP、云顶高度CTH、对流层折叠最深深度TFTP_Z_depth、降水估计QPE等5类产品进行可用性分析。结果表明：（1）FY-4A数据接收率和物理保存情况，足以支持实时监测预警业务；（2）5类产品在宁夏短时强降水个例中有不同的表现，其中CLT、CLP具有较好的可用性，可以较好的判断云的类别；而CTH和QPE均存在较大误差且均为偏小趋势，需结合其他手段予以订正；CTT、TFTP_Z_depth两种产品与短时强降水的对应关系较为明显，而CTH高值有利于出现强降水，但并不是出现强降水的必要条件。整体来说，FY-4A卫星在宁夏短时强降水天气中具有一定可用性和参考性，可为对流性天气判别、人工影响天气作业提供较好的数据支持。

**关键词：**FY-4A卫星；短时强降水；适用性分析；统计分析；宁夏

自20世纪60年代第一颗气象卫星成功发射至今，卫星探测技术得到迅速发展，建立了全球卫星观测体系，大大丰富了气象观测的内容和范围，突破了人类只能从底层探测大气的局限性。在以往的西北地区灾害性天气过程研究工作中，学者们更多依赖于地基观测资料[1-6]。然而在下垫面复杂的西北地区，地基观测存在站点稀疏和地形遮挡等问题，往往无法得到完整的对流云团信息[7]。与之相比，卫星观测具备覆盖范围广、连续观测、参数完备等优势，能够提供多时次、大范围、连续性的云微物理探测信息[8-9]，可以有效补充地基观测的不足。

风云四号A星（简称FY-4A）是我国第二代地球静止轨道定量遥感气象卫星的首发星，也是世界上最先进的新一代静止气象卫星之一[10-11]。于2016年12月11日成功发射，2017年9月25日正式交付使用，2018年以来，中国气象局明确要求应加强风云卫星资料在气象预报中的业务应用。

FY卫星数据业务应用方面的研究很多，其中利用最多的就是应用在强对流天气[12-22]、大气污染遥感监测[23-25]、辐射遥感应用[26-33]、云微物理[34-35]、天气系统跟踪识别[36-37]等方面。目前学者们已经对风云卫星系列产品的适用性开展了许多评估工作，以往的卫星产品检验评估方法一是利用与国内外其他卫星同类产品进行交叉检验分析，以科学评估被检验卫星参数的精度及其在天气监测中的适应性及可靠性[38-41]；二是通过与地面同类型观测产品进行交叉比对，如通过辐射观测数据[32,42]、地面人工云观测数据[43]、自动站数据[44-46]、地面积雪数据[47]等开展对比检验。三是通过统计分析，检验卫星观测数据，如通过分析云导风产品误差开展卫星产品同化试验[48]、通过构建卫星云气候数据集评估卫星数据精度[49]、通过多种误差灵敏度分析卫星探测仪性能[50]。也有研究卫星数据在不同地区的适用性的，如有学者针对卫星降水产品在太行山区[41]、黄河源区[51]、中亚地区[52]的适用性分别进行了评估。

更多FY卫星产品的应用以及适用性还需开展

**收稿日期：**2022-08-29； **修订日期：**2022-10-15
**基金项目：**宁夏回族自治区青年拔尖人才项目（2017-RQ0086）；中国气象局预报员专项（CMAYBY2020-131）；宁夏回族自治区重点研发项目（2018BEG030020）联合资助
**作者简介：**邵建（1981-），男，高级工程师，从事天气预报和气象防灾减灾技术研究. E-mail: shaosdh@163.com

进一步的研究，尤其是近年来气候变化使得宁夏暴雨的极端性、影响性日益凸显[53-57]，利用多源资料做好暴雨尤其是致灾的短时强降水监测预警尤为重要。本文试图从数据传输保存、数据适用性两个方面着手，采用数据传输率结合天气学分析方法，对云类型CLT、云相态CLP、云顶高度CTH、对流层折叠最深深度TFTP_Z_depth、降水估计QPE等5类产品的适用性进行分析。

## 1　资料及方法

### 1.1　所用资料

1.1.1　FY-4A资料　FY-4A卫星搭载仪器有多通道扫描成像辐射计（AGRI）、干涉式大气垂直探测仪（GIIRS）、闪电成像仪（LMI）和空间天气监测仪等4种探测器，主要有32类定量产品。本文主要在多通道扫描成像辐射计（AGRI）观测数据中，选取云类型CLT（Cloud Type）、云相态CLP（Cloud Phase）、云顶高度CTH（Cloud Top Height）、对流层折叠最深深度TFTP_Z_depth（Tropopause Folding Depth）、降水估计QPE（Quantitative Precipitation Estimation）等5类产品进行适用性分析（表1）。数据格式为MICAPS第4类格式。

FY-4A卫星资料长度：2018—2020年的每年5月1日0:00—9月30日23:00。

1.1.2　对比数据选取　云体特征观测数据：选取银川国家基准气候站的人工云观测数据和高空探测数据，其中人工云观测数据为逐8 h观测报文；高空探测数据为每日08:00、20:00探空数据。

自动站数据：小时雨量≥10 mm·h$^{-1}$；能够与对流云团卫星产品时段对应。利用自动站逐1 min数据，累计得到与卫星QPE产品所对应时段的15 min累计降水量。利用自动站小时雨量对比分析QPE小时累计量。

卫星降水估计产品：逐15 min间隔，分析分钟级数据误差；将1 h 4个时刻QPE累计得到小时QPE结果分析小时雨量误差。数据为MICAPS第4类格式，1.25 km间隔格点。在文中构建样本序列时，利用强降水发生地经纬度位置，采用距离反比插值方法，读取改点位置的卫星产品数据，形成样本序列。

上述资料长度均与FY-4A卫星数据长度一致，为2018—2020年的每年5月1日0:00—9月30日23:00。

### 1.2　FY-4A数据窗设定及关键信息提取

设定影响区和关键区两类数据窗（图1，蓝色框为影响区，紫色框为关键区），从而实现更为有效、快捷的数据处理、冗余数据剔除和数据分析。影响区的范围为：30°~50°N、95°~115°E，大致为西北地区中东部地区。关键区的范围为：33°~40°N、102°~110°E，包括宁夏全区及其上下游。

基于FY-4A卫星MICAPS第4类格式数据，针对宁夏短时强降水灾害天气，基于其发生地经纬度，利用插值算法提取卫星数据中的关键信息和有效信息。

### 1.3　数据接收率

目前FY-4A数据产品主要通过全国综合气象信息共享平台（CIMISS）、中国气象局卫星数据广播系统接收站（CMA-Cast）及地面接收站等3个途径收集。其中，前2个途径下发的数据为MICAPS第4类格式（“.000”格点化数据，保留半年）或AWX格式（保留半年），地面接收站接收的数据为“.NC”标准数据格式（仅保留1个月），可以满足实时预警监测和短时间回溯使用。

采用统计分析方法，对多通道扫描成像辐射计中L1、L2通道数据接收率进行统计分析（图2）。其中，L1通道14个通道平均接收率为84%~93%，最低接收率为64%~80%。L2通道30个产品，平均接收率94%~99%，最低接收率为83%~95%。传输率完

**表1　FY-4A部分产品参数**

**Tab. 1　Product parameters of FY-4A satellite**

| 产品 | 英文缩写 | 调取参数及产品 | 最小分辨率 | 更新频次 |
|---|---|---|---|---|
| 云相态 | CLP | CLP（Cloud Phase，云相态，无单位） | | |
| 云类型 | CLT | CLT（Cloud Type，云类型，无单位） | 4 km | ① 60 min |
| 云顶高度 | CTH | CTH（Cloud Top Height，云顶高，km） | | ② 15 min |
| 降水估计 | QPE | Precipitation（Quantitative Rainfall Rate Estimation，定量降水估测，mm） | 1 km | ③ 不定时 |
| 对流层顶折叠检测 | TFP | TFTP_Z_depth（Tropopause folding uppermost height，对流层折叠最深深度，km） | | |

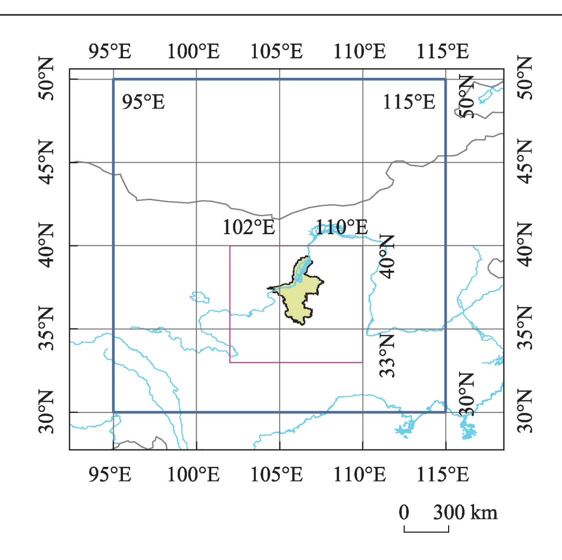



图1　卫星数据处理数据窗

Fig. 1　Processing area of satellite data

全符合宁夏强对流天气监测预警的业务需求。

### 1.4　产品选取原则

主要考虑以下原则：

（1）选取与强降水相关且能够直接描述云特性的产品进行可用性分析。一般描述云体特征，大致包括云状、云底高度、云厚、云顶高度、云的类别、云顶气温（亮温）、云体结构等参数。FY-4A卫星能够观测或计算输出有云顶高度CTH、云顶气温CTT、云顶黑体亮温TBB、云顶气压CTP、云类型CLT、云相态CLP、云检测CLM等。

（2）选取可以直接获取人工观测数据和计算得到的产品进行适用性研究。如云类型、云顶高度、降水估计等。因银川国家基准气候站为目前国内8个仍保留人工观测的站点之一，其人工观测数据可用于对比分析。

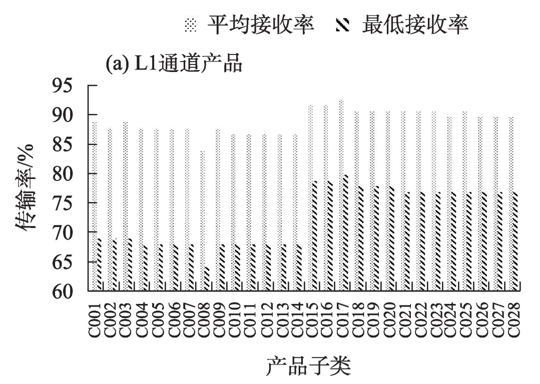
（3）选取发生或持续时间与银川探空站的观测时间段重合的个例，作为云顶高度CTH分析的个例。即短时强降水的发生持续时间，至少包括一部分的探空气球施放时间。

综合以上3条原则，选取银川国家基准气候站人工观测数据为对比值，选取云类型、云检测、云顶高度、云顶气温这4项观测产品分析其适用性。

## 2　适用性分析

### 2.1　云类型CLT和云相态CLP

从表2可以看出，在2018—2020年发生在银川的短时强降水过程中，云类型（CLT）产品中数据表明，54.6%为暖冷混合云（观测值为4）、24.46%为暖水云（观测值为2）、6.96%为过冷水云（观测值为3），以上3类总共占比86.02%，其他类型的云占比均较低。相对应的，云相态（CLP）数据分析结果，混合态



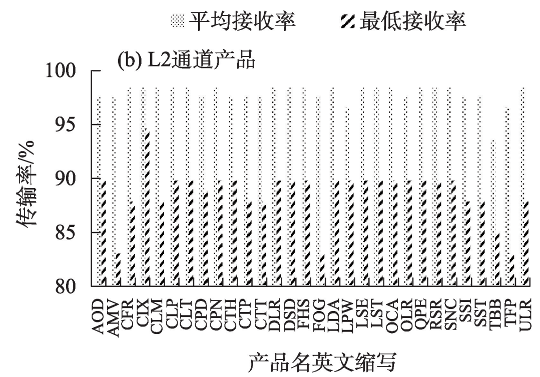




图2　各通道接收率统计

Fig. 2　Statistical chart of reception rate of each channel

**表2　短时强降水个例中云类型（CLT）和云相态（CLP）统计特征**

**Tab. 2　Statistical characteristics of CLT and CLP in short-time severe precipitation cases during 2018-2020**

| 产品定义 | 取值范围 | 无云 | 暖水云或液态(水) | 过冷水云或过冷液态 | 混合云或混合态 | 冰云或固态(冰) | 卷云 | 多层云 | 不确定 | 太空 | 填充值 | 无云 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 云类型CLT | 数值 | 0 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 9 | 126 | 127 | 0 |
| | 占比/% | 11.09 | 24.46 | 6.96 | 54.6 | 0.72 | 1.11 | 0.84 | 0 | 0 | 0 | 11.09 |
| 云相态CLP | 数值 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | - | - | - | 126 | 127 | 0 |
| | 占比/% | 7.99 | 14.11 | 15.52 | 60.12 | 2.21 | - | - | - | 0 | 0 | 7.99 |

云(观测值为3)达60.12%,过冷液态(观测值为2)为15.52%,液态(观测值为1)为14.11%,3类合计占比89.75%。表明银川的短时强降水天气所对应的云团以液态云为主(暖冷混合云、暖水云、过冷水云),固态云较少。另外,在短时强降水发生的情况下还有11.09%、7.99%被判断为无云,这可能与取值插值方法和资料时间差有关。

综上所述,云类型(CLT)和云相态(CLP)在宁夏具有较好的可用性。可以较好地判断云的类别,为对流性天气判别、人工影响天气作业提供较好的数据支持。

## 2.2 云顶高度CTH

验证云顶高度CTH适用性的思路大致如下:通过经验分析得出不同云属的云底高度范围$H_b$,然后通过相对湿度和露点法估算云体厚度$H_t$,二者相加得到估算的云顶高度$H_{top}$,以此结果与CTH对比估计其可用性。则估算云顶高度的计算公式如下:

$$H_{top} = H_b + H_t \tag{1}$$

2.2.1 人工观测云底高度范围 由表3可以看出,宁夏低云、中云的云底高度区间基本为600~2000 m,而高云的云底高度区间一般为2500~4500 m,卷云则更高一些。其中,可出现降水的云主要有积雨云、层积云、雨层云、高层云等4种类型,这4种云属中,底高最低的可达600 m左右(积雨云、层积云、雨层云),较高的则在2500 m左右(高层云)。

表3 各云属常见云底高度范围

Tab. 3 Range of bottom height of clouds

| 云属 | 是否可降水 | 常见云底高度范围/m | 云属 | 是否可降水 | 常见云底高度范围/m |
|---|---|---|---|---|---|
| 积云 | 否 | 600~2000 | 高层云 | 是 | 2500~4500 |
| 积雨云 | 是 | 600~2000 | 高积云 | 否 | 2500~4500 |
| 层积云 | 是 | 600~2500 | 卷云 | 否 | 4500~10000 |
| 层云 | 否 | 50~800 | 卷层云 | 否 | 4500~8000 |
| 雨层云 | 是 | 600~2000 | 卷积云 | 否 | 4500~8000 |

2.2.2 云底高度、云顶高度估算 根据银川国家基准气候站的探空数据,利用相对湿度和露点法估算云的厚度。其计算公式如下:

$$RH_{th} = \begin{cases} 91, & (0 \leqslant h < 1) \\ -6.416h + 97, & (1 \leqslant h < 2) \\ -1.223h + 87, & (2 \leqslant h < 7.562) \\ -4h + 108, & (7.562 \leqslant h < 10) \\ 68, & (10 < h \leqslant 15) \end{cases} \tag{2}$$

式中:$RH_{th}$为不同高度范围的相对湿度阈值(%);$h$为高度(km)。在此公式基础上,推断出简化的云判断阈值,基本上认为相对湿度$RH \geq 75\%$时就可以认为是云区,$RH \geq 80\%$时则基本可以判断为云区。

2.2.3 CTH观测误差分析 利用上述方法,对2018—2020年宁夏短时强降水天气过程的云特征进行分析,可以得到CTH观测值与探空估算、人工观测值对比(表4)。

从表4中可以看出,CTH观测的最小值平均为2355 m、最大值平均为8905 m,观测平均值为6005 m。最小值、最大值、平均值与探空估算高度对比计算的相对误差分别为-6834 m、-284 m、-3183 m,与探空估算高度对比计算的绝对误差分别为6894 m、665 m、3224 m。根据卫星遥感监测是自上而下的观测特性,重点对比CTH观测值中最大值的特征,因此,可以认为FY-4A卫星对于云高的观测为偏小趋势(相对误差<0),即与探空估算的云高有665 m的平均误差;但误差间距为665~6894 m,监测数据稳定度较差。

从CTH观测值与探空估测值绝对误差统计占比(表5)来看,对于观测最低值的绝对误差来看,大于67%的误差超过3000 m,而均值绝对误差则超过41%,而与观测最高值间的绝对误差则更合理些,其中误差小于500 m的占比53.45%,500~1000 m、1000~2000 m的分别占比22.41%、24.14%,而未出现大于2000 m以上的误差;小于1000 m的误差占比为75.86%。对于上万米高度的对流云团,1000 m以内的误差被认为是可接受的。综上所述,在利用探空估测值对比分析云顶高度时,采用最高值估计更为合理些;而CTH在宁夏短时强降水天气中具有一定的可用性和参考性,在日常业务中需结合其他手段予以订正。

表4 CTH观测值与探空估算中人工观测值对比

Tab. 4 Comparison between CTH observation data and artificial observation data /m

| | 人工观测云底高度均值 | 探空估算云高均值 | CTH观测值 | | | 相对误差 | | | 绝对误差 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 最小值平均 | 最大值平均 | 平均值 | 与低值估算差 | 与高值估算差 | 与均值估算差 | 与低值估算差 | 与高值估算差 | 与均值估算差 |
| 对比值 | 1498 | 9189 | 2355 | 8905 | 6005 | -6834 | -284 | -3183 | 6894 | 665 | 3224 |

表5　CTH观测值与探空估测值绝对误差统计占比

Tab. 5　Absolute error comparison between CTH observation data and Tlog-P estimate value　/%

| 绝对误差统计区间 | 与低值估算差 | 与高值估算差 | 与均值估算差 |
|---|---|---|---|
| ≤500 m | 0.00 | 53.45 | 6.90 |
| 500~1000 m | 17.15 | 22.41 | 15.17 |
| 1000~2000 m | 10.10 | 24.14 | 13.74 |
| 2000~3000 m | 5.17 | 0.00 | 22.71 |
| >3000 m | 67.58 | 0.00 | 41.48 |

### 2.3　降水估计QPE

分析2018—2020年出现短时强降水的自动站逐15 min降水实况和逐小时降水实况与FY-4A卫星QPE产品之间的误差对比(表6),评估其可用性。

从表6中可以看到,FY-4A卫星QPE产品对短时强降水具有一定的指示意义,其15 min(1 h)QPE的最大相对偏差为2.45 mm(9.5 mm),最小相对偏差为−25.27 mm(−76.2 mm),平均相对偏差为−4.09 mm(−16.79 mm),整体估计较实况明显偏小,相对误差小于0的高达99.28%(98.77%)。从绝对误差来看,15 min(1 h)QPE的最大绝对误差为25.27 mm(76.2 mm),最小绝对误差为0.11 mm(0.88 mm),平均绝对误差为4.12 mm(16.88 mm);误差值小于10%、20%、30%的占比分别为7.55%(11.32%)、30.19%(30.19%)、56.6%(52.83%)。按照绝对误差值与大值比不大于10%的标准来衡量,FY-4A卫星15 min(1 h)QPE产品的可用性仅为约8%(11%);按照比值不大于30%的标准来衡量,相应产品的可用性升高至约57%(53%)。综上所述,FY-4A卫星QPE产品较实况整体明显偏小,此趋势可以经统计订正等方法予以应用。

表6　FY-4A卫星QPE产品与实况降水的偏差对比

Tab. 6　Comparison between QPE data and observation rain data

| | QPE相对偏差 | | QPE绝对误差 | |
|---|---|---|---|---|
| | 15 min | 1 h | 15 min | 1 h |
| 最大值/mm | 2.45 | 9.50 | 25.27 | 76.20 |
| 最小值/mm | −25.27 | −76.20 | 0.11 | 0.88 |
| 平均值/mm | −4.09 | −16.79 | 4.12 | 16.88 |
| 偏差偏小占比/% | 99.28 | 98.77 | – | – |
| 偏差偏小占比/% | 0.72 | 1.23 | – | – |
| 绝对误差值与大值比小于10%的占比/% | – | – | 7.55 | 11.32 |
| 绝对误差值与大值比小于20%的占比/% | – | – | 30.19 | 30.19 |
| 绝对误差值与大值比小于30%的占比/% | – | – | 56.60 | 52.83 |

## 3　FY-4A产品连续性特征分析

选取云顶气温CTT、云顶高度CTH、对流层折叠最深深度TFTP_Z_depth这3个产品,将其与对应的短时强降水个例降水量进行对比,分析其相关性和连续性特征。

### 3.1　云顶气温CTT

在研究时段内,采集到的CTT总样本数为22199个。按照短时强降水发生时段和数据有效性判断原则(下同),从中选出合格样本4745个,将其标准化处理后,构建为样本序列进行分析。

根据云物理学,冰晶云或混合云因云光学厚度很大,云顶有效发射辐射温度近似为云顶温度;而暖水云的云顶有效发射辐射温度与实际云顶温度存在较大差异。云顶温度一般的区间为−80~30 ℃;而西北地区的对流云往往云顶气温≤10 ℃。

由图3可以看出,CTT序列与降水量为明显的负相关,相关系数已达−0.59;标准化后的CTT序列的上下区间为−0.64~0.88(原序列值区间为162.13~285.15 K),对应的原CTT序列平均值为254.31 K(−17.55 ℃),最低温达到162.13 K(−111.02 ℃)。

### 3.2　云顶高度CTH

在研究时段内,采集到的CTH总样本数为23152个,选出合格样本5632个,标准化处理后,构建为样本序列进行分析。根据天气学原理,一般雨层云云底高度600~2000 m,积雨云600~4500 m,考虑到云厚度一般300 m以上,故取云顶高度1000 m为最低值。

CTH原序列的上下区间为1000.6~15656.6 m,平均值为6707.7 m,极值跨越区间超过14600 m,数据跨度非常大,故对原序列数据进行标准化处理。从图4中可以看到,标准化后的CTH区间为−0.1~0.97,跨度仍然较大,且与降水量间的相关性不明显(相关系数不足0.3)。表明CTH与短时强降水的雨强基本没有直接的相关性,云顶高只是有利于出现强降水,但并不是出现强降水的充分必要条件。

### 3.3　对流层折叠最深深度TFTP_Z_depth

对流层折叠最深深度(TFTP_Z_depth,缩写为

TZD,下同)是FY-4A中TFP产品中包括的2类数据之一。TZD是表征对流折叠深度的物理量,日常业务中很少应用。在研究时段内,采集有效的TZD样本数共115个。

由图5可知,图中TZD与降水曲线走势较为一致,二者间具明显的正相关(相关系数达0.73)。在TZD原序列中,其区间范围为0.01~0.38 km,对应的标准化后区间为-0.51~0.49,样本间的观测差距不

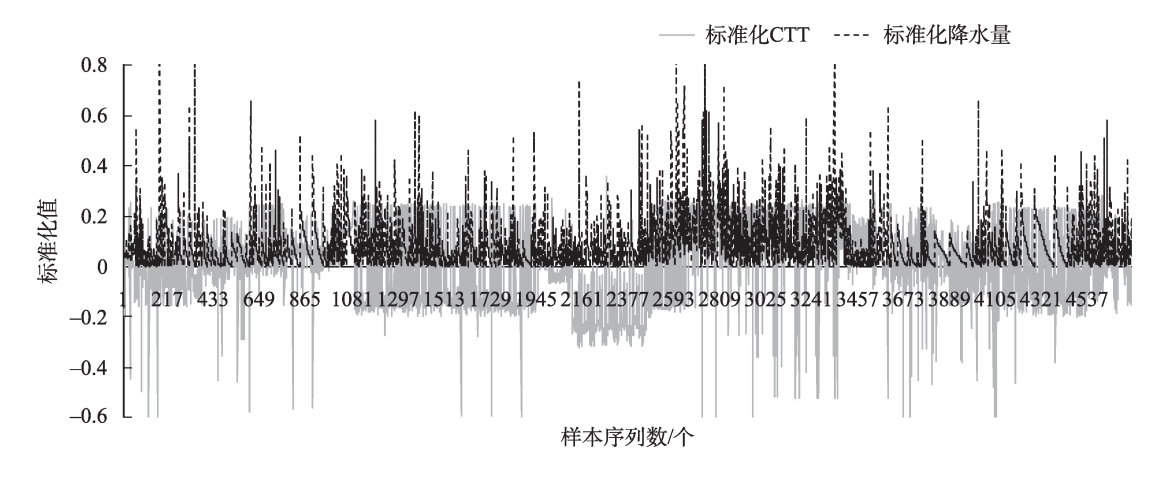



图3 标准化后的CTT与降水量变化

Fig. 3 Standardization sequence data comparison between CTT and precipitation

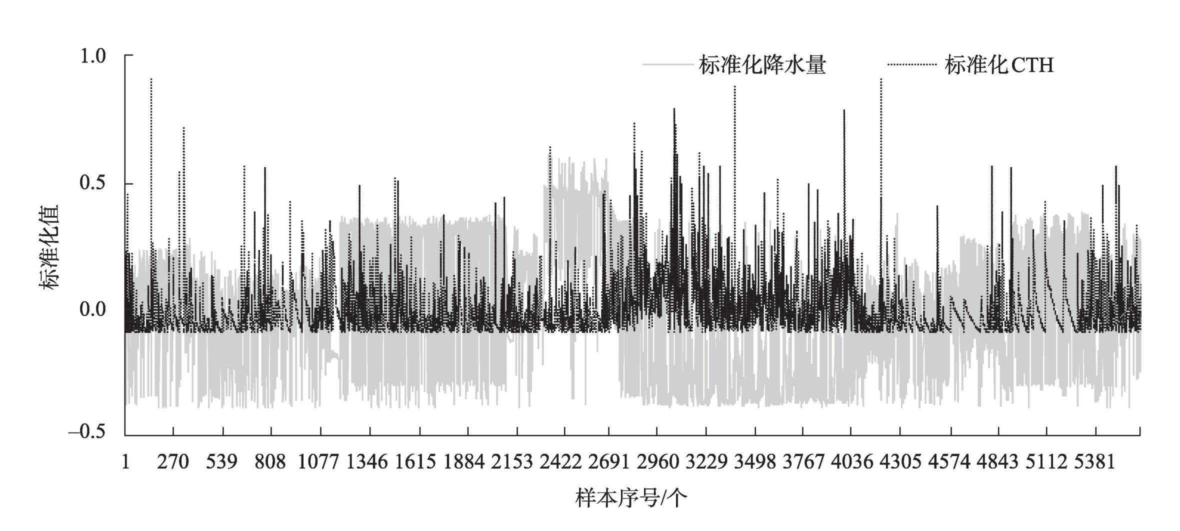



图4 标准化后的CTH与降水量变化

Fig. 4 Standardization sequence data comparison between CTH and precipitation

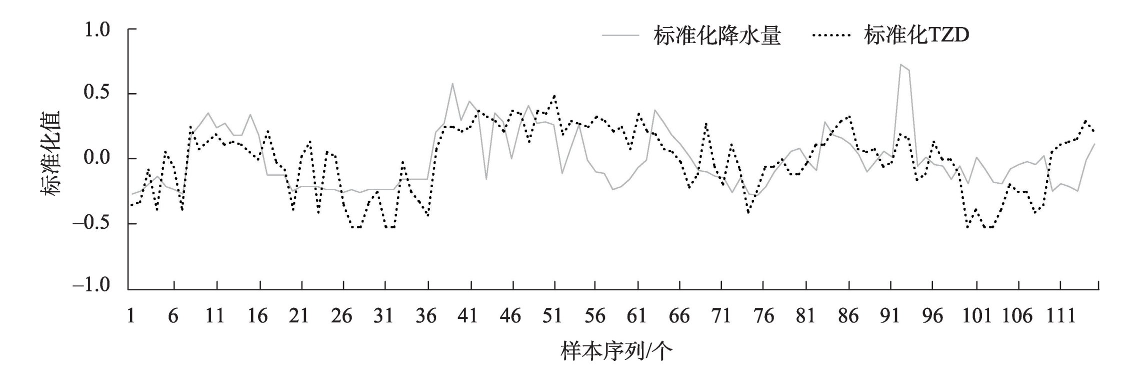



图5 标准化后的TZD与降水量变化

Fig. 5 Standardization sequence data comparison between TZD and precipitation

算大,表明TZD产品在宁夏具有较好的适用性。

## 4　结 论

(1) 从数据接收和物理保存的情况来看,FY-4A卫星数据可用性较好,其5类产品在宁夏短时强降水个例中的表现不一,可以为监测预警、人工影响天气作业等业务提供数据支持。

(2) CLT、CLP具有较好的可用性,可以较好的判断云的类别。宁夏的短时强降水天气所对应的云团以液态云为主(暖冷混合云、暖水云、过冷水云),固态云极少。

(3) CTH和QPE均存在较大误差且均为偏小趋势,需结合其他手段予以订正。其中CTH具有偏小趋势,与人工观测和探空估算值有约665 m的平均误差;但绝对误差跨度达6000 m以上,稳定度较差。QPE整体偏小,可尝试利用订正手段予以应用。

(4) 选取3个产品(CTT、CTH、TFTP_Z_depth)长序列样本,与对应个例的降水量进行相关性和连续性特征分析。其中CTT、TFTP_Z_depth两种产品与短时强降水的对应关系较为明显,分别为明显的负相关和正相关,而CTH与短时强降水的雨强基本没有直接的相关性,云顶高只是有利于出现强降水,但并不是出现强降水的充分必要条件。

**参考文献(References):**

[1] 井喜, 李栋梁, 李明娟, 等. 青藏高原东北侧一次突发性大暴雨环境场综合分析[J]. 高原气象, 2008, 27(1): 46-57. [Jing Xi, Li Dongliang, Li Mingjuan, et al. Synthetic analyses on environmental conditions of an abrupt heavy rainstorm on the Northeast side of Tibetan Plateau[J]. Plateau Meteorology, 2008, 27(1): 46-57. ]

[2] 杨莲梅, 关学锋, 张迎新. 亚洲中部干旱区降水异常的大气环流特征[J]. 干旱区研究, 2018, 35(2): 249-259. [Yang Lianmei, Guan Xuefeng, Zhang Yingxing. Study on atmospheric circulation characteristics of precipitation anomalies in arid region of Central Asia[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(2): 249-259. ]

[3] 邵建, 胡文东, 杨有林, 等. 基于图形学的致旱天气系统自动识别技术[J]. 干旱区研究, 2019, 36(3): 664-669. [Shao Jian, Hu Wendong, Yang Youlin, et al. Automatic recognition technology of weather systems resulting in drought based on graphics[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(3): 664-669. ]

[4] 刘治国, 陶健红, 杨建才, 等. 冰雹云和雷雨云单体VIL演变特征对比分析[J]. 高原气象, 2008, 27(6): 1363-1374. [Liu Zhiguo, Tao Jianhong, Yang Jiancai, et al. Contrast analyses on variation characters of vertically integrated liquid water content about hail cloud cell and thundercloud cell[J]. Plateau Meteorology, 2008, 27(6): 1363-1374. ]

[5] 张之贤, 张强, 赵庆云, 等. "8·8"舟曲特大山洪泥石流灾害天气特征分析[J]. 高原气象, 2013, 32(1): 290-297. [Zhang Zhixian, Zhang Qiang, Zhao Qingyun, et al. Analyses on disaster weather characteristics of masssive mudslide in Zhouqu Gansu on 8 August 2010[J]. Plateau Meteorology, 2013, 32(1): 290-297. ]

[6] 许东蓓, 许爱华, 肖玮, 等. 中国西北四省区强对流天气形势配置及特殊性综合分析[J]. 高原气象, 2015, 34(4): 973-981. [Xu Dongpei, Xu Aihua, Xiao Wei, et al. Comprehensive analysis on the severe convective weather situation configuration and its particularity in Northwest China[J]. Plateau Meteorology, 2015, 34(4): 973-981. ]

[7] Matrosov S Y, Heymsfield A J. Estimating ice content and extinction in precipitating cloud systems from Cloud-Sat radar measurements[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2008, 113(D00A05): 1-8.

[8] 范思睿, 王维佳. 利用FY-4A卫星反演产品对飞机增雨作业的分析[J]. 高原山地气象研究, 2018, 38(4): 60-66, 84. [Fan Sirui, Wang Weijia, et al. A case analysis of FY-4A satellite-retrieved of artificial precipitation enhancement operation[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2018, 38(4): 60-66, 84. ]

[9] 徐小红, 余兴, 朱延年, 等. 6·23龙卷FY-2G卫星云微物理特征分析[J]. 高原气象, 2018, 37(6): 1737-1748. [Xu Xiaohong, Yu Xing, Zhu Yannian, et al. Cloud microphysical properties of a tornado revealed by FY-2G geostationary satellite[J]. Plateau Meteorology, 2018, 37(6): 1737-1748. ]

[10] 张志清, 陆风, 方翔, 等. FY-4卫星应用和发展[J]. 上海航天, 2017, 34(4): 8-19. [Zhang Zhiqing, Lu Feng, Fang Xiang, et al. Application and development of FY-4 meteorological satellite[J]. Aerospace Shanghai, 2017, 34(4): 8-19. ]

[11] 王清平, 吴晓京, 陈阳权, 等. FY-4A卫星数据可视化及应用[J]. 气象科技, 2020, 47(3): 502-507. [Wang Qingping, Wu Xiaojing, Chen Yangquan, et al. Visualization and application of FY-4A satellite data[J]. Meteorological Science and Technology, 2020, 47(3): 502-507. ]

[12] 黄荣, 刘日胜, 刘国忠, 等. FY3极轨卫星资料在暴雨短时预报中的应用分析[J]. 气象研究与应用, 2018, 39(2): 41-44, 71, 144. [Huang Rong, Liu Risheng, Liu Guozhong, et al. Application of FY3 satellite data in short-term rainstorm forecast[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2018, 39(2): 41-44, 71, 144. ]

[13] 邵建, 任小芳, 王勇, 等. 一次雨转暴雪天气过程卫星云图中尺度特征分析[J/OL]. 宁夏大学学报(自然科学版): 1-7[2023-02-14]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/64.1006.N.20210929.0858.004.html. [Shao Jian, Ren Xiaofang, Wang Yong, et al. Analysis on mesoscale characteristics of satellite cloud images for a rain to blizzard weather process[J]. Journal of Ningxia University(Naturnal Science Edition), 1-7[2023-02-14]. http://kns.cnki.net/kcms/

detail/64.1006.N.20210929.0858.004.html. ]

[14] 丁明月, 王俐俐, 辛渝, 等. 基于CloudSat卫星资料对中亚低涡暴雨个例的诊断分析和数值模拟[J]. 干旱区研究, 2020, 37(4): 936-946. [Ding Yueming, Wang Lili, Xin Yu, et al. Diagnostic analysis and numerical simulation of a Central Asian vortex rainstorm based on CloudSat satellite data[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(4): 936-946. ]

[15] 吴晓京, 朱小祥, 毛紫阳, 等. 风云二号气象卫星红外观测在云团降水监测中的应用[J]. 海洋气象学报, 2020, 39(3): 1-10. [Wu Xiaojing, Zhu Xiaoxiang, Mao Ziyang, et al. Algorithm design of convective precipitation monitoring and early warning sercice using FY-2 infrared data[J]. Journal of Marine Meteorology, 2020, 39(3): 1-10. ]

[16] 何立富, 陈双, 郭云谦. 台风利奇马(1909)极端强降雨观测特征及成因[J]. 应用气象学报, 2020, 31(5): 513-526. [He Lifu, Chen Shuang, Guo Yunqian, et al. Observation characteristics and synoptic mechanisms of typhoon lekima extreme rainfall in 1909[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2020, 31(5): 513-526. ]

[17] 张一平, 俞小鼎, 王迪, 等. 河套及周边地区干线触发对流天气特征初步分析[J]. 高原气象, 2021, 40(5): 1024-1037. [Zhang Yipping, Yu Xiaoding, Wang Di, et al. A preliminary analysis of the characteristics of drylines and its triggering convections in the Hetao and surrounding regions[J]. Plateau Meteorology, 2021, 40(5): 1024-1037. ]

[18] 刘佳, 罗向阳. 风云二号多通道卫星数据对流单体检测[J]. 遥感学报, 2020, 24(8): 1023-1031. [Liu Jia, Luo Xiangyang. Detection of convective cells using multi-channel satellite data from FY-2[J]. Journal of Remote Sensing, 2020, 24(8): 1023-1031. ]

[19] 陈宏, 杨晓君, 易笑园, 等. 北上台风"安比"后期两个阶段暴雨落区分布的差异性分析[J]. 高原气象, 2021, 40(5): 1087-1100. [Chen Hong, Yang Xiaojun, Yi Xiaoyuan, et al. Analysis of difference in distribution of rainstorms in the later two stages of northward-moving typhoon ampil[J]. Plateau Meteorology, 2021, 40(5): 1087-1100. ]

[20] 魏栋, 刘丽伟, 田文寿, 等. 基于卫星资料的西北地区高原涡强降水分析[J]. 高原气象, 2021, 40(4): 829-839. [Wei Dong, Liu Liwei, Tian Wenshou, et al. Analysis of the heavy precipitation caused by plateau vortex in Northwest China based on satellite data[J]. Plateau Meteorology, 2021, 40(4): 829-839. ]

[21] 罗敬宁, 刘立葳. 遥感大数据分布式技术研究与实现[J]. 应用气象学报, 2017, 28(5): 621-631. [Luo Jingning, Liu Liwei. Research and implementation of remote sensing big data distributed technology[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2017, 28(5): 621-631. ]

[22] 江琪, 桂海林, 张天航, 等. 基于FY-4A卫星资料的中国区域网格化地表大气颗粒物浓度估算[J]. 气象, 2020, 46(10): 1297-1309. [Jiang Qi, Gui Hailin, Zhang Tianhang, et al. Estimation of gridding surface atmospheric particle matter concentration in China based on FY-4A satellite observation[J]. Meteorological Monthly, 2020, 46(10): 1297-1309. ]

[23] 王继竹, 郭英莲, 徐双柱, 等. 湖北省卫星云图短时暴雨概率预报方法及应用[J]. 气象科技, 2014, 42(3): 460-465. [Wang Jizhu, Guo Yinglian, Xu Shuangzhu, et al. Application of satellite data in probabilistic forecasting for short-time rainstorms in Hubei Province[J]. Meteorological Science and Technology, 2014, 42(3): 460-465. ]

[24] 闵文彬, 李宾, 彭俊, 等. 青藏高原东南部及其邻近地区FY-2E卫星晴空大气可降水量评估[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(4): 625-631. [Min Wenbin, Li Bin, Peng Jun, et al. Evaluation of total precipitable water derived from FY-2E satellite data over the Southeast of Tibetan Plateau and its adjacent areas[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(4): 625-631. ]

[25] 许梦婕, 鲍艳松, 许丹, 等. 基于FY-4A卫星数据反演气溶胶光学厚度及分析应用[J]. 中国环境科学, 2020, 40(12): 5162-5168. [Xu Mengjie, Bao Yansong, Xu Dan, et al. Retrieval of aerosol optical depth based on FY-4A satellite data and its analysis and application[J]. China Environmental Science, 2020, 40(12): 5162-5168. ]

[26] 王雪芹, 徐卫红, 向朔育, 等. 基于FY-4A卫星资料分析暴雨云系特征[J]. 高原山地气象研究, 2020, 40(1): 36-40. [Wang Xueqin, Xu Weihong, Xiang Shuoyu, et al. Analysis of rainstorm cloud system characteristics based on FY-4A satellite data[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2020, 40(1): 36-40. ]

[27] 祝存兄, 史飞飞, 乔斌, 等. 基于高分1号卫星数据的青海湖扩张及湖滨沙地变化特征分析[J]. 干旱区研究, 2022, 39(4): 1076-1089. [Zhu Cunxiong, Shi Feifei, Qiao Bin, et al. Analysis of Qinghai Lake expansion and lakeside sandy land change characteristics based on GF-1 satellite[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(4): 1076-1089. ]

[28] 阮永健, 吴秀芹. 基于GRACE和GLDAS的西北干旱区地下水资源量可持续性评价[J]. 干旱区研究, 2022, 39(3): 787-800. [Ruan Yongjian, Wu Xiuqin. Evaluation of groundwater resource sustainability based on GRACE and GLDAS in arid region of Northwest China[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(3): 787-800. ]

[29] 陈兴鹃, 黄淑娥, 樊建勇, 等. 基于FY-3A/VIRR卫星资料的江西省大雾遥感监测[J]. 气象研究与应用, 2018, 39(1): 91-95. [Chen Xingjuan, Huang Shu'e, Fan Jianyong, et al. Remote sensing monitoring of fog in Jiangxi based on FY-3A/VIRR satellite data[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2018, 39(1): 91-95. ]

[30] 闵敏, 吴晓. 从FY-4A卫星遥感数据和GFS资料估算全天空状况下的地表长波辐射通量[J]. 气象, 2020, 46(3): 336-345. [Min Min, Wu Xiao. Estimating surface longwave radiation flux under all-sky condition from FY-4A and GFS data[J]. Meteorological Monthly, 2020, 46(3): 336-345. ]

[31] 王素娟, 崔鹏, 张鹏, 等. FY-3C/VIRR海表温度产品及质量检验. 应用气象学报, 2020, 31(6): 729-739. [Wang Sujuan, Cui Peng, Zhang Peng, et al. FY-3C/VIRR sea surface temperature products and quality validation[J]. Journal of Applied Meteorologi-

cal Science, 2020, 31(6): 729-739. ]

[32] 徐丽娜, 申彦波, 李忠, 等. 基于概率密度匹配方法的FY-4A地表入射太阳辐射订正[J]. 高原气象, 2021, 40(4): 932-942. [Xu Lina, Shen Yanbo, Li Zhong, et al. Correction of FY-4A surface solar irradiance based on probability density function matching method[J]. Plateau Meteorology, 2021, 40(4): 932-942. ]

[33] 姜红, 何清, 曾晓青, 等. 基于随机森林和卷积神经网络的FY-4A号卫星沙尘监测研究[J]. 高原气象, 2021, 40(3): 680-689. [Jiang Hong, He Qing, Zeng Xiaoqin, et al. Sand and dust monitoring using FY-4A satellite data based on the random forests and convolutional neural networks[J]. Plateau Meteorology, 2021, 40(3): 680-689. ]

[34] 周万福, 田建兵, 康小燕, 等. 基于FY-2卫星数据的青海东部春季不同类型降水过程云参数特征[J]. 干旱气象, 2018, 36(3): 431-437. [Zhou Wangfu, Tian Jianbing, Kang Xiaoyan, et al. Characteristics of retrieved cloud parameters during precipitation processes with different types in spring in eastern Qinghai[J]. Journal of Arid Meteorology, 2018, 36(3): 431-437. ]

[35] 李浩, 邓军英, 刘岩, 等. 一次暴雨过程云中液态水微物理属性垂直分布[J]. 干旱区研究, 2015, 32(1): 161-167. [Li Hao, Deng Junying, Liu Yan, et al. Vertical distribution of microphysical properties of liquid water in cloud during a rainstorm[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(1): 161-167. ]

[36] 任素玲, 方翔, 卢乃锰, 等. 基于气象卫星的青藏高原低涡识别[J]. 应用气象学报, 2020, 30(3): 345-359. [Ren Sulin, Fang Xiang, Lu Naimeng, et al. Recognition method of the Tibetan Plateau vortex based on meteorological satellite data[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2020, 30(3): 345-359. ]

[37] 张琪, 任景轩, 肖红茹, 等. 基于FY-4A卫星资料的四川盆地MCC初生和成熟阶段特征[J]. 大气科学, 2021, 45(4): 863-873. [Zhang Qi, Reng Jingxuan, Xiao Hongru, et al. Characteristics of MCC from convective initiation to mature stage over the Sichuan basin based on FY-4A satellite data[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2021, 45(4): 863-873. ]

[38] 李帅, 陈勇航, 侯小刚, 等. FY-2F云量产品在新疆区域的评估及检验[J]. 干旱区研究, 2021, 38(4): 1031-1039. [Li Shuai, Chen Yonghang, Hou Xiaogang, et al. Evaluation of FY-2F satellite cloud products in Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(4): 1031-1039. ]

[39] 崔林丽, 郭巍, 葛伟强, 等. FY-4A卫星云顶参数精度检验及台风应用研究[J]. 高原气象, 2020, 39(1): 196-203. [Cui Linli, Guo Wei, Ge Weiqiang, et al. Comparisons of cloud top parameter of FY-4A satellite and its typhoon application research[J]. Plateau Meteorology, 2020, 39(1): 196-203. ]

[40] 刘健, 崔鹏, 肖萌. FY-2G卫星冬夏云量产品偏差分析[J]. 应用气象学报, 2017, 28(2): 177-188. [Liu Jian, Cui Peng, Xiao Meng. The bias analysis of FY-2G cloud fraction in summer and winter[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2017, 28(2): 177-188. ]

[41] 俞琳飞, 张永强, 张佳华, 等. 卫星降水产品在太行山区的适用性初步评估[J]. 高原气象, 2020, 39(4): 819-829. [Yu Linfei, Zhang Yongqiang, Zhang Guihua, et al. Preliminarily evaluate the applicability of satellite precipitation products over the Taihang Mountains[J]. Plateau Meteorology, 2020, 39(4): 819-829. ]

[42] 梁进秋, 申彦波, 胡丽琴, 等. FY-4A地表太阳入射辐射产品在山西高原的适用性研究[J]. 气象, 2020, 46(12): 1575-1585. [Liang Jinqiu, Shen Yanbo, Hu Liqin, et al. Applicability of FY-4A surface solar irradiance products in the Loess Plateau of Shanxi[J]. Meteorological Monthly, 2020, 46(12): 1575-1585. ]

[43] 薛筝筝, 黄玉学, 杨有林, 等. FY-2G卫星云量产品在宁夏的分析检验[J]. 气象水文海洋仪器, 2019, 36(2): 19-25. [Xue Zhengzheng, Huang Yuxue, Yang Youlin, et al. Analysis and test on cloud products of FY-2G satellite in Ningxia[J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instruments, 2019, 36(2): 19-25. ]

[44] 丁蕾锭, 卢涵宇, 卢天健, 等. FY2G卫星降水产品在云贵高原地区的效用评估[J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2020, 44(6): 1691-1699. [Ding Leiding, Lu Hanyu, Lu Tianjian, et al. Effect evaluation of FY2G satellite precipitation products in Yunnan-Kweichow plateau[J]. Journal of Guangxi University(Natural Science Edition), 2020, 44(6): 1691-1699. ]

[45] 王雅正, 杨元建, 刘超, 等. 风云三号卫星微波遥感土壤水分产品在山东地区的适用性分析[J]. 中国农业气象, 2021, 42(4): 318-329. [Wang Yazheng, Yang Jianyuan, Liu Chao, et al. Analysis on the applicability of Fengyun-3 satellite microwave remote sensing soil moisture products in Shandong[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2021, 42(4): 318-329. ]

[46] 杨纲, 郭鹏, 李西灿, 等. 风云卫星微波遥感土壤水分产品适用性验证分析[J]. 水土保持研究, 2020, 27(1): 104-111, 118. [Yang Gang, Guo Peng, Li Xican, et al. Assessment on applicability of soil moisture products of Fengyun satellite microwave remote sensing[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(1): 104-111, 118. ]

[47] 闵文彬, 彭骏, 李施颖. 青藏高原FY-3C卫星积雪产品评估[J]. 国土资源遥感, 2021, 33(1): 145-151. [Min Wenbin, Peng Jun, Li Shiying. The evaluation of FY-3C snow products in the Tibetan Plateau[J]. Remote Sensing For Land & Resources, 2021, 33(1): 145-151. ]

[48] 陈耀登, 沈洁, 范水勇, 等. FY-4A卫星云导风观测误差优化及同化效果影响研究[J]. 大气科学学报, 2021, 44(3): 418-427. [Chen Yaodeng, Shen Jie, Fan Shuiyong, et al. A study of the observational error statistics and assimilation applications of the FY-4A satellite atmospheric motion vector[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2021, 44(3): 418-427. ]

[49] 刘健, 王锡津. 主要卫星云气候数据集评述[J]. 应用气象学报, 2017, 28(6): 654-665. [Liu Jian, Wang Xijin, et al. Assessment on main kinds of satellite cloud climate datasets[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2017, 28(6): 654-665. ]

[50] 农川, 尹球, 宋慈, 等. FY-4A静止气象卫星红外高光谱大气探测仪GIIRS探测灵敏度分析[J]. 红外与毫米波学报, 2021, 40(3): 353-362. [Nong Chuan, Yin Qiu, Song Ci, et al. Sensitivity

analysis of the satellite infrared hyper-spectral atmospheric sounder GIIRS on FY-4A[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2021, 40(3): 353-362. ]

[51] 刘兆晨, 杨梅学, 万国宁, 等. 新型卫星降水产品在黄河源区的适用性分析[J]. 高原气象, 2021, 40(2): 403-410. [Liu Zhaochen, Yang Meixue, Wan Guoning, et al. Applicability of new satellites precipitation products in source region of Yellow River: Using SWAT model as an example[J]. Plateau Meteorology, 2021, 40(2): 403-410. ]

[52] 马玉芬, 李如琦, 张萌, 等. AIRS辐射亮温在中亚地区的偏差分析及适用性[J]. 干旱区研究, 2021, 38(1): 12-21. [Ma Yufen, Li Ruqi, Zhang Meng, et al. Bias analysis and applicability evaluation of the atmospheric infrared sounder (AIRS) radiance in Central Asia[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(1): 12-21. ]

[53] 邵建. 宁夏暴雨特征及客观预报方法研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2015. [Shao Jian. A Study on Rainstorm and Its Objective Forecasting Methods in Ningxia Area[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2015. ]

[54] 邵建, 裴晓蓉, 刘娟, 等. 近53 a宁夏暴雨时空分布特征[J]. 干旱气象, 2015, 33(4): 595-601. [Shao Jian, Pei Xiaorong, Liu Juan, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of rainstorms in Ningxia during 1961-2013[J]. Journal of Arid Meteorology, 2015, 33(4): 595-601. ]

[55] 陈晓娟, 王咏青, 毛璐, 等. 贺兰山区两次极端暴雨动力作用数值模拟分析[J]. 干旱区研究, 2020, 37(3): 680-688. [Chen Xiaojuan, Wang Yongqin, Mao Lu, et al. Numerical simulation analysis of the dynamic effects of terrain on two extreme rainstorms on Helan Mountain[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(3): 680-688. ]

[56] 邵建, 闫军, 裴晓蓉, 等. 自组织神经网络算法在宁夏暴雨天气分型中的应用[J]. 干旱气象, 2018, 36(5): 852-857. [Shao Jian, Yan Jun, Pei Xiaorong, et al. Application of self-organizing maps method in rainstorm classification in Ningxia[J]. Journal of Arid Meteorology, 2018, 36(5): 852-857. ]

[57] 闫军, 王黎娟, 纪晓玲, 等. 影响宁夏的热带气旋远距离暴雨特征和预报概念模型[J]. 热带气象学报, 2020, 36(1): 32-41. [Yan Jun, Wang Lijuan, Ji Xiaolin, et al. Characteristics and conceptual models of tropical-cyclone-induced remote precipitation event in Ningxia[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2020, 36(1): 32-41. ]

# Application of FY-4A satellite data in short-time severe precipitation of Ningxia

SHAO Jian[1,2,3], ZHANG Suzhao[1,4], CHEN Min[2], LI Qiang[4], ZHENG Youjiong[2], CHENG Yao[2], MA Ning[5]

(1. Key Laboratory for Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning and Risk Management of Characteristic Agriculture in Arid Regions, China Meteorological Administration, Yinchuan 750002, Ningxia, China; 2. Yinchuan Meteorological Bureau, Yinchuan 750002, Ningxia, China; 3. Ningxia Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Reduction, Yinchuan 750002, Ningxia, China; 4. Ningxia Meteorological Observatory, Yinchuan 750002, Ningxia, China; 5. Ningxia Meteorological Information Center, Yinchuan 750002, Ningxia, China)

**Abstract:** By using FY-4A satellite data and artificial observation data of recent (2018-2020) severe precipitation cases in Ningxia, four different FY-4A satellite product types are examined in terms of their availability. Results show that: (1) The data transmission rate and physical preservation of FY-4A are sufficient to support real-time monitoring and early warning services; (2) The five kinds of products i.e., Cloud Type (CLT), Cloud Phase (CLP), Cloud Top Height (CTH), Quantitative Rainfall-Rate Estimation (QPE), and Tropopause Folding Depth (TFTP_Z_depth), have different performances in the case of severe convective weathers in Ningxia. Among them, CLT and CLP have good availability, making it possible to determine the type of cloud more accurately. However, both CTH and QPE have large errors and tend to be smaller, so they need to be revised in conjunction with other means. The relationship between CTT or TFTP_Z_depth products and recent severe precipitation is obvious. The high value of CTH is conducive to the occurrence of heavy precipitation but is not a necessary condition. Overall, the FY-4A satellite has certain usability and reference in severe convective weather in Ningxia, which can provide better data support for convective weather discrimination and artificial influence on weather operation.

**Keywords:** FY-4A satellite; short-time severe precipitation; applicability analysis; statistical analysis; Ningxia